



SOCIEDAD ESTÁNDARES DE INGENIERÍA PARA AGUAS Y SUELOS LTDA.

MÓDULO 5 **DISEÑO EN** **CANALES DE** **EVACUACIÓN DE** **AGUAS LLUVIAS**

Autores:

Dr. Ing. Roberto Pizarro T.

Ing. Juan Pablo Flores V.

Ing. Claudia Sangüesa P.

Ing. Enzo Martínez A.

1. INTRODUCCIÓN:

En las distintas actividades de desarrollo de áreas rurales, que abordan las instituciones y organismos públicos, adquiere una singular importancia, el accionar que pueda llevarse a cabo con el recurso hídrico, toda vez que infiere especiales limitantes al desarrollo de las zonas áridas.

Si a lo anterior, se adiciona el hecho de que la recolección de agua, a nivel de ladera o cauce, es un trabajo costoso en sectores con economías de subsistencia, además de involucrar alto riesgo en la conducción del recurso, se enfrenta un esquema de trabajo que exige una optimización fina de las posibilidades de protección del agua, derivado de que ésta ofrece las mayores potencialidades de desarrollo productivo en zonas áridas.

En función de lo expuesto, el presente documento, pretende entregar una visión pragmática acerca del diseño y construcción de canales para conducción de agua.

2. DISEÑO DE CANALES.

Cuando se llega a intentar el diseño de un canal, debe considerarse un aspecto previo, que dice relación con el tipo de sección transversal que se elegirá, para llevar a cabo el proceso. Así, la que ofrece las mejores perspectivas de construcción, es la sección trapezoidal, en función de diseño, replanteo y aspectos de costos.

En este contexto, a continuación se definen los elementos de diseño de un canal trapezoidal, mediante dos metodologías que serán analizadas. La primera, dice relación con un método que contempla caudal y velocidad de diseño conocidas, en tanto la segunda, utiliza como elemento base de diseño la ecuación de Manning, para estimación de caudales. Sin embargo, ambas presentan como denominador común, ciertas consideraciones de diseño, referidas al valor que debe adoptar el radio hidráulico.

Así, un efectivo diseño deberá contemplar, la maximización del valor del radio hidráulico, es decir,

$$R \sim \text{máx } R$$

Si el radio hidráulico se define, como el cociente entre el área de la sección (A) y el perímetro mojado (Pm),

$$R = \frac{A}{Pm}$$

se desprende que el radio ideal estará definido por el perímetro mojado mínimo, situación que llega a definir para este caso.

$$R = \frac{h}{2}$$

donde,

R= radio hidráulico.

h= tirante o altura efectiva del canal

Las consideraciones matemáticas sobre este punto, se presenta en el anexo 1 de este documento, en tanto la figura 1, representa la sección transversal del canal en comento.

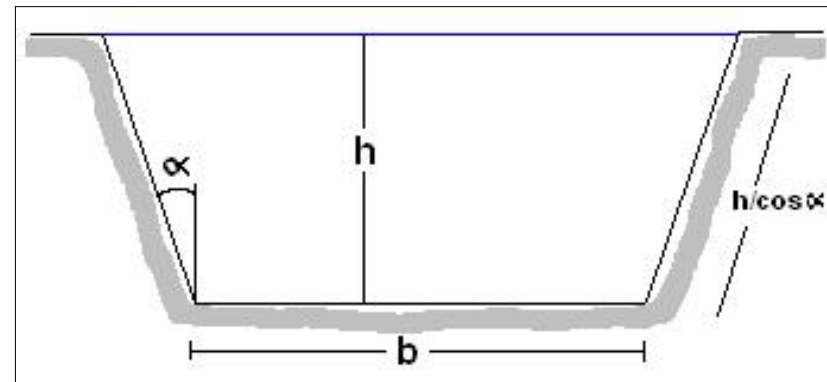


Fig.1. Sección transversal de un canal trapezoidal.



SOCIEDAD ESTÁNDARES DE INGENIERÍA PARA AGUAS Y SUELOS LTDA.

2.1. Diseño con velocidad del agua conocida.

2.1.1. Cálculo del caudal a conducir.

El caudal a ser encauzado por una obra hidráulica de este tipo, es una información fundamental en el diseño. Así, este gasto puede ser conocido con antelación, no obstante que lo más común, es enfrentarse a un monto desconocido.

En la circunstancia de realizar el cálculo, éste puede ser ejecutado como sigue, pensando en un caudal continuo, y la obtención del agua desde una toma fluvial, o derivación fluvial.

Así,

$$Q = d \times s$$

donde,

d= dotación máxima estacional asignada al canal en l/s/há. (en la estación punta).

S= superficie a regar en há.

Si el caudal no es continuo, es decir en un lapso posee intervalos sin gasto, el caudal hay que afectarlo de un factor de corrección, que incorpore un posible mayor gasto por unidad de tiempo:

$$Q = d \times s \times FC$$

en que,

$$FC = \frac{NHM}{NHT \times NTM}$$

y donde;

FC= factor de corrección.

NHT= número de horas por turno de agua.

NTM= número de turnos en un mes considerado.

NHM= número de horas del mes considerado.

Asimismo, deben considerarse otros factores como eficiencia de aplicación del riego, y pérdida por conducción, los cuales serán incorporados por el ingeniero a la luz de los antecedentes que posea.

Por otra parte, es conveniente definir un caudal de diseño con un margen de seguridad, en función de la superficie que el canal debe abastecer, dado que en ocasiones se producen cambios en los patrones cultivos, para lo cual se puede utilizar la tabla que entrega Hidalgo Granados, que permite ponderar el valor de caudal ya estimado, como un factor de seguridad.

CUADRO N°1. Coeficiente de seguridad para dimensionamiento de canales frente a dos o más cultivos, en función de superficie.

Superficie (há)	Coeficiente de seguridad (c)
40	1.7
41 - 80	1.6
81 - 120	1.5
121 - 160	1.4
161 - 200	1.3
201 - 240	1.2
241 - 280	1.1
281	1.0

Fuente: Ciancaglini, citando a Hidalgo Granados.

Finalmente, existen situaciones en las cuales se conocen los caudales a ser conducidos, especialmente si éste deriva de represas, cisternas u obras reguladoras, o bien, a través de estadísticas de aforos con que se pueda contar.

Luego, si bien es fundamental el cálculo del caudal para el diseño, éste no ofrece mayores problemas para su estimación.

2.1.2. Cálculo de la sección del canal (A).

Si se considera que en términos generales, el caudal se define como el producto de la sección del canal, y la velocidad del agua, se aprecia que el elemento restante para validar la definición de la sección, lo constituye la velocidad del agua.

Así,



$$A = \frac{Q}{V}$$

donde,

A= sección del canal (m²)

Q= caudal en m³/s.

V= velocidad en m/s.

Ahora bien, la velocidad del agua involucrada, es aquella que sea máxima en función del tipo de superficie que posea el canal, de tal manera que no sea erosiva. Dicha velocidad máxima, puede ser determinada en la tabla de Agres y Scoates (1939), citada por Ciancaglini.

CUADRO N°2. Velocidades máximas permitidas en canales (Agres y Scoates, 1939, aumentada con valores de Foster, 1967).

Material	Velocidad (m/s)
Suelo arenoso muy suelto	0.30 - 0.45
Arena gruesa o suelo arenoso suelto	0.46 - 0.60
Suelo arenoso promedio	0.61 - 0.75
Suelo franco arenoso	0.76 - 0.83
Suelo franco de aluvión o ceniza volcánica	0.84 - 0.90
Césped de crecimiento ralo o débil	0.90
Suelo franco pesado o franco arcilloso	0.90 - 1.20
Suelo con vegetación regular	1.22
Suelo arcilloso o cascajoso	1.20 - 1.50
Césped vigoroso, denso y permanente	1.52 - 1.83
Conglomerados, cascajo cementado, pizarra blanda	1.80 - 2.40
Roca dura	3.00 - 4.50
Hormigón	4.51 - 6.00

Fuente: Ciancaglini citando a Foster.

Por ende, a partir de la determinación de velocidad máxima, es posible definir la sección del canal.

2.1.3. Cálculo del tirante (h).

El tirante o altura efectiva del canal, para ser definido, necesita previamente definir el ángulo de inclinación del talud del canal, con respecto a la vertical, dado que la formulación matemática obtenida a través de la maximización del radio hidráulico, así lo determina.

En este contexto, h se define como sigue:

$$h = \sqrt{\frac{A \cos \alpha}{2 - \sin \alpha}}$$

donde,

A = sección transversal del canal.

α = ángulo del talud con respecto a la vertical.

Por otra parte, el ángulo α se limita en canales de tierra, en virtud del proceso erosivo que puedan sufrir las márgenes del canal. En ese contexto, la elección del ángulo debe ser cuidadosa y en función de lo que la experiencia señale, aunque se puede recomendar que a no sea menor a 20°, en términos muy generales. De igual forma, si el canal se encuentra adecuadamente revestido, a puede asumir cualquier valor.

2.1.4. Cálculo de la base de fondo (b).

La base del canal, está determinada por la siguiente expresión:

$$b = \frac{A}{h} - h \times \operatorname{tg} \alpha$$

donde todos los términos son conocidos.

2.1.5. Cálculo de la longitud del talud (l).

La longitud de talud, se define como sigue:



$$l = \frac{h}{\cos \alpha}$$

$$R = \frac{h}{2}$$

por consiguiente el perímetro mojado es, $P = b + 2l$.

En este contexto, y en función de la expresión que consigue maximizar el radio hidráulico, es posible obtener relaciones entre α , b y l .

Así se puede dar lo siguiente, en términos de ejemplo orientador a la elección del ángulo.

- Si $\alpha = 36.37^\circ \Rightarrow b = l/2$
- Si $\alpha = 30.00^\circ \Rightarrow b = l$
- Si $\alpha = 21.47^\circ \Rightarrow b = 2l$
- Si $\alpha = 16.31^\circ \Rightarrow b = 3l$
- Si $\alpha = 13.00^\circ \Rightarrow b = 4l$

2.1.6. Cálculo de la pendiente del canal (s).

se aplica la ecuación de Manning, queda,

$$Q = \frac{1}{n} \times S^{1/2} \times R^{2/3} \times A$$

donde;

Q= caudal a conducir en m³/s.

n= coeficiente de rozamiento de Manning, el cual se entrega en el anexo 2.

s= pendiente longitudinal del canal (m/m)

R= radio hidráulico (m)

A= sección transversal (m²)

El radio hidráulico, se define a través de la expresión que permite su maximización, a saber,

Por lo tanto, todos los términos de la ecuación de Manning son conocidos, a excepción de s , que es la incógnita a resolver.

2.1.7. Cálculo de la revancha (r).

Con el objetivo de evitar derrames por turbulencia y oleaje del agua, se hace necesario estructurar un margen de seguridad; por ello, se adiciona a la longitud del talud, el valor "r", o revancha, que se define empíricamente como sigue;

$$r = \frac{1}{3} \times h$$

,o bien a través del empirismo que el constructor posea para este tipo de obras.

2.2. Diseño a través de Manning.

El diseño de un canal a través de Manning, asume dos elementos básicos en la definición, los cuales están relacionados con la determinación del radio hidráulico máximo, y la expresión matemática de la sección transversal, derivada de la primera (Ver anexo 1).

En este marco, tanto el radio hidráulico, como la sección transversal, se expresan en función de la altura o tirante, del canal, además del ángulo de inclinación del talud. Así,

$$R = \frac{h}{2} \quad (1) \quad \text{y} \quad A = \frac{h^2 \times (2 - \sin \alpha)}{\cos \alpha} \quad (2)$$

Luego, en un diseño de canales basado en este método, que es sólo una variación del primero, se requiere definir el coeficiente de rugosidad (n), la pendiente del canal, y el ángulo de inclinación del talud, con lo cual se determina lo siguiente:



$$Q = \frac{1}{n} \times S^{1/2} \times \left(\frac{h}{2}\right)^{2/3} \times \frac{h^2 \times (2 - \operatorname{sen} \alpha)}{\cos \alpha} \quad (3)$$

De (3) se obtiene h , valor que al ser reemplazado en (2), determina A , que es la sección transversal. Posteriormente, se define la base del canal a través de la expresión señalada en 2.1.4.; en forma similar, y por medio de la ecuación del punto 2.1.5., se obtiene la longitud del talud, con lo cual se posee el diseño íntegro del canal, a excepción de la revancha que puede ser definida empíricamente, o bien a través de la expresión matemática expuesta en el punto 2.1.7.

3. CONSIDERACIONES FINALES

La metodología planteada y ejemplificada en los anteriores puntos, corresponde a una de tipo práctico con una sólida base teórica que permite solventar los requerimientos básicos de diseño en canales trapeciales.

De lo expuesto, se desprende que las metodologías reseñadas son variaciones de lo que cada una por separado presenta, por lo cual la forma de exposición que se ha adoptado en este documento, posee como objetivo representar el hecho de que frente a distintas problemáticas de trabajo, los elementos técnicos que se han definido, son capaces de dar respuesta a tales requerimientos, en forma total o parcial.

El diseño de canales con otro tipo de sección transversal, como la rectangular, obedece a elementos matemáticos que poseen similar

asidero técnico, al señalado en este documento, por lo cual es posible realizar otras derivaciones si ello fuese necesario.

Finalmente, resta destacar que por sobre la determinación matemática de un canal, cobra especial relevancia el replanteo de la obra en terreno, así como llevar a cabo una cuidadosa y eficiente construcción, todo lo cual define la obtención de una utilidad marginal significativa en el contexto económico, así como una practicidad efectiva y eficiente a las demandas del sistema social en zonas rurales.

4. BIBLIOGRAFÍA

Ciancaglini, N. 1986. Canales de conducción del agua. Manual de Uso y Conservación del Agua en Zonas Rurales de América Latina y el Caribe. Tomo II (Borrador). Proyecto Regional Mayor de UNESCO-ROSTLAC, Montevideo, Uruguay, p.i.

Domínguez, F. 1974. Hidráulica. Fac. Cs. Físicas y Matemáticas. U. de Chile, Editorial Universitaria, 757 p.

López Cadenas de Llano, F. 1983. Hidráulica. Fundación Conde del Valle de Salazar. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid, España. 354 p.

Vennard, J. 1965. Elementos de la mecánica de los fluidos. Compañía Editorial Continental. México. 479 p.



ANEXO 1:
Definición de la sección transversal hidráulica óptima

Si se analiza la ecuación de Manning (2.1.6.), en una sección dada A, con una pendiente uniforme s, con un nivel de caudal Q estable, y definida una rugosidad, la mejor sección transversal estará dada, cuando el radio hidráulico sea máximo. Así, si se define al radio hidráulico R, como el cociente entre la sección A, y el perímetro mojado P, el radio máximo estará dado cuando el perímetro mojado sea mínimo, lo cual significa menor cantidad de materiales empleados en la construcción, y trabajo asociado, todo lo cual determina un ahorro importante de costos.

Con el objetivo de visualizar lo anterior, y para definir el dimensionamiento adecuado de un canal trapezoidal, se desarrollará el esquema matemático de cálculo. De esta manera, si se analiza la figura 1, se desprende que:

$$A = b \times h + h^2 \operatorname{tg} \alpha$$

$$P = b + 2 \frac{h}{\cos \alpha} = \frac{A}{h} - h \times \operatorname{tg} \alpha + 2 \frac{h}{\cos \alpha}$$

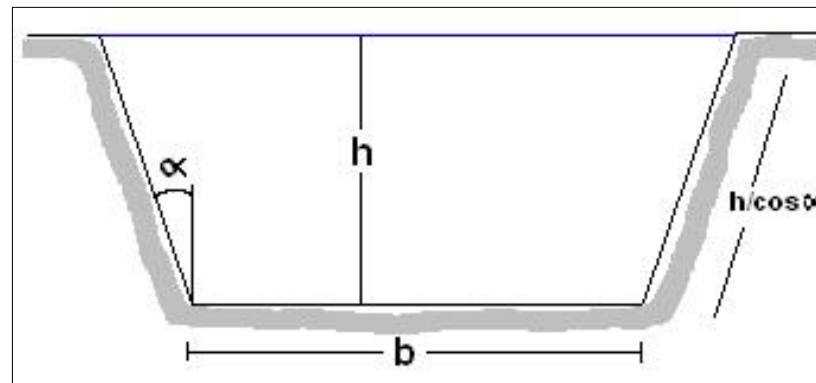


Fig.1: Sección transversal de un canal trapezoidal.

Por consiguiente, operando de tal forma que la base b no se incorpore al cálculo, queda;

$$R = \frac{A}{\frac{A}{h} - h \times \operatorname{tg} \alpha + 2 \frac{h}{\cos \alpha}} = \frac{A \times h \times \cos \alpha}{A \times \cos \alpha + h^2 (2 - \operatorname{sen} \alpha)} \quad (1)$$



SOCIEDAD ESTÁNDARES DE INGENIERÍA PARA AGUAS Y SUELOS LTDA.

derivando con respecto a h , e igualando a cero se obtiene;

$$\frac{\partial R}{\partial h} = \frac{A \times \cos \alpha (A \times \cos \alpha + h^2 (2 - \operatorname{sen} \alpha) - 2A \times h^2 \times \cos \alpha (2 - \operatorname{sen} \alpha))}{(A \times \cos \alpha + h^2 (2 - \operatorname{sen} \alpha))^2} = 0 \quad (2)$$

con lo que,

$$\frac{\partial R}{\partial h} = A \times \cos \alpha + h^2 (2 - \operatorname{sen} \alpha) = 0 \quad (3)$$

$$A = \frac{h^2 (2 - \operatorname{sen} \alpha)}{\cos \alpha} \quad (4)$$

o bien,

$$h = \sqrt{\frac{A \cos \alpha}{2 - \operatorname{sen} \alpha}} \quad (5)$$

Reemplazando (4) en (1), resulta,

$$R = \frac{(2 - \operatorname{sen} \alpha) \times h^3}{h^2 (2 - \operatorname{sen} \alpha) + h^2 (2 - \operatorname{sen} \alpha)} \quad (6)$$

de lo que se infiere

$$R = \frac{h}{2} \quad (7)$$

Por lo que, la maximización del radio hidráulico, con el fin de asegurar un diseño óptimo de canales trapeciales, ocurre cuando éste se hace igual al tirante o altura del canal, dividido por dos.



SOCIEDAD ESTÁNDARES DE INGENIERÍA PARA AGUAS Y SUELOS LTDA.

ANEXO 2:

Valores de “n” dados por Horton, para ser empleados en la fórmula de Manning

Superficie	Condiciones			
	Perfectas	Buenas	Regulares	Malas
Canales y Zanjas				
Canales revestidos con concreto	0.012	0.014*	0.016*	0.018
En tierra, alineados y uniformes	0.017	0.020	0.0225	0,025*
En roca, lisos y uniformes	0.025	0.030	0.033*	0.035
En roca, con salientes y sinuosos	0.035	0.040	0.045	
Sinuosos y de escurrimiento lento	0.0225	0.025*	0.0275	0.030
Dragados en tierra	0.025	0.0275*	0.030	0.033
Con lecho pedregoso y bordos de tierra, enhierbados	0.025	0.030	0.035*	0.040
Plantilla de tierra, taludes ásperos	0.028	0.030	0.033	0.035
Corrientes naturales				
1. Limpios, bordos rectos, llanos, sin hendiduras ni charcos profundos	0.025	0.0275	0.030	0.033
2. Igual a 1, pero con algo de hierbas y piedra	0.030	0.033	0.035	0.040
3. Sinuoso, algunos charcos y escollos limpios	0.033	0.035	0.040	0.045
4. Igual a 3, de poco tirante con pendiente y sección menos eficientes	0.040	0.045	0.050	0.055
5. Igual a 3, algo de hierba y piedras	0.035	0.040	0.045	0.050
6. Igual a 4, secciones pedregosas	0.045	0.050	0.055	0.060
7. Ríos perezosos, cauce enhierbado o con charcos profundos	0.050	0.060	0.070	0.080
8. Cauces muy enhierbados	0.075	0.100	0.125	0.150

* Valores corrientemente usados en la práctica.

Extractado de Canales de Desviación; Ciancaglini, N.1966, Argentina, UNESCO.